

Для повышения технико-экономических показателей печи необходимо произвести реконструкцию ее системы отопления, а именно:

1) перестроить инжекционные горелки в двухпроводные (дутьевые), максимально используя преимущества первых. Это позволит им работать на низком давлении коксодоменного газа.

2) для инъекции воздуха горения через керамический рекуператор установить дымоходы – высокотемпературные вентиляторы, работающие при температуре воздуха до 700°C. Это поспособствует получению необходимого высокого давления на входе в горелочное устройство.

3) установить дополнительный металлический трубчатый рекуператор для подогрева коксодоменной смеси до 300°C в дымовом борове последовательно за воздушным рекуператором [3]. Применение подогрева газовой смеси в горелках низкого давления в результате улучшения условий воспламенения топлива и ускорения реакции горения ведет к сокращению длины факела и дает возможность работать с меньшим коэффициентом избытка воздуха. Что в свою очередь обуславливает дополнительную экономию топлива, так как сокращаются потери химического и физического тепла с уходящими из печи дымовыми газами.

После проведения модернизации удельный расход топлива снизится до 2,1 ГДЖ/т, снизятся потери металла с окалинообразованием на 20%, перепад температур по сечению металла станет 50°C, увеличится производительность печи на 10%.

Список использованных источников

1. Гущин С.Н, Казяев М.Д., Крюченков Ю.В., Кутин В.Б., Лобанов В.И., Ярошенко Ю.Г. Теория и практика теплогенерации: учебник. Изд 2-е. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 379 с.
2. Кривандин В.А, Белоусов В.В, Сборщиков Г.С. и др. Теплотехника металлургического производства. Т.2. Конструкция и работа печей: Учебное пособие для вузов. – М.: МИСИС, 2001. – 736 с.
3. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. – М.: Металлургия, 1975. – 296 с.

УДК 536.242:536.421

А. И. Цаплин, В. Н. Нечаев, И. Л. Никулин

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В АППАРАТАХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГУБЧАТОГО ТИТАНА С РАЗЛИЧНЫМ ЦИКЛОВЫМ СЪЕМОМ

Аннотация

Приведены результаты численного моделирования, полученные на основе математической модели, описывающей динамику неравновесного теплообмена в технологическом процессе восстановления титана из его тетрахлорида в расплаве магния. Для промышленных аппаратов с цикловым съёмом 4,8 и 7,0 т губчатого титана получены поля температур и функции тока в расплаве магния.

Ключевые слова: губчатый титан, расплав магния, теплообмен, математическая модель.

Abstract

The results of numerical modeling obtained on the basis of a mathematical model describing the dynamics of non-equilibrium heat and mass transfer in the technological process of titanium

removal from its tetrachloride in magnesium melt are given. For industrial devices with the cyclic removal 4.8 and 7.0 t of titanium sponge temperature fields and current functions in molten magnesium are obtained.

Keywords: sponge titanium, magnesium melt, heat and mass transfer, mathematical model.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленное получение губчатого титана в России начато в 1960 г., в настоящее время данная технология достаточно хорошо изучена [1; 2]. В промышленности технически чистый титан получают магниетермическим восстановлением тетрахлорида титана (ТХТ). В нашей стране существуют два современных предприятия-производителя губчатого титана: это АВИСМА – филиал ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА» и Соликамский магниевый завод. В металлургическом цехе АВИСМА находятся в эксплуатации 2 типа аппаратов восстановления с цикловым съёмом 4,8 и 3,7 т губчатого титана. На СМЗ применяются аппараты производительностью 7 т за цикл. Применяемая технология является сложной и энергозатратной. На предприятии АВИСМА на переделах восстановления и вакуумной сепарации требуется затратить 4,7–5,2 МВт·ч электроэнергии на получение 1 тонны титана [3], для Соликамского магниевого завода эта величина составляет около 6 МВт·ч на тонну.

Недостаточная производительность и высокая конечная стоимость губчатого титана ограничивают развитие промышленного способа получения этого металла [4; 5].

Детальное изучение неравновесных процессов тепломассопереноса с использованием математического моделирования и разработка на этой основе рациональных технологических режимов ведения процессов в аппарате восстановления с цикловой производительностью 4,8 т показаны в работах [6; 7]. Разработанная математическая модель использована для описания процессов тепломассопереноса в аппарате с цикловым съёмом 7 т губчатого титана на стадии разогрева, который предшествует процессу восстановления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 представлены реальный объект – промышленная установка восстановления и расчётная схема. Установка включает в себя печь 3, в шахту которой помещён аппарат, состоящий из реторты-реактора 2 цилиндрической формы герметично закрытой крышкой 1. Перед началом процесса в реторту заливается расплав магния до определённого уровня 9. На практике для проведения процессов восстановления в аппаратах 4,8 и 7,0 т/цикл губчатого титана необходима общая навеска магния, равная 8,3 и 11,8 т соответственно. В ходе начальной стадии процесса восстановления осуществляют разогрев залитого магния в аппарате до температуры 800–850°C, затем на поверхность разогретого расплава начинают порционную подачу тетрахлорида титана. По мере образования твёрдые частицы титана оседают в расплаве на решётку 7, где в ходе процесса формируется блок, имеющий развитую пористую структуру. Образующийся по реакции хлорид магния периодически сливается из аппарата. Теплообменник 5 предназначен для отвода избыточного тепла экзотермической реакции, он состоит из двух рядов каналов 8. Разогрев аппарата и поддержание температуры процесса на заданном уровне осуществляется при помощи электронагревателей 4 и 6.

Установки восстановления производительностью 4,8 и 7,0 т/цикл не имеют принципиальных отличий, поэтому расчётная схема для них аналогична. Представленная на рис. 1 расчетная область имеет осевую симметрию, ограничена слева осью симметрии, справа – стенкой реторты, в нижней части – решёткой эллиптического днища, сверху – уровнем расплава в реторте. Расчётная область полностью заполнена расплавом магния.

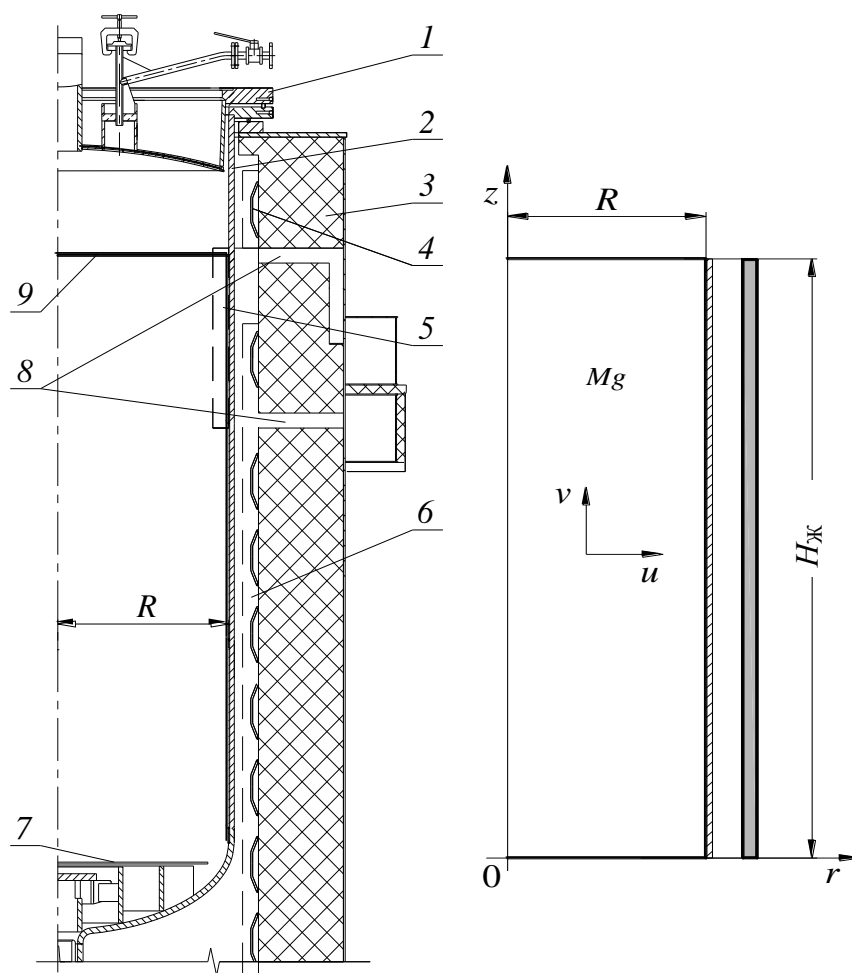


Рис. 1. Общий вид аппарата и печи восстановления (слева):

- 1 – крышка; 2 – реторта; 3 – шахтная электропечь; 4 – верхний нагреватель;
5 – теплообменник; 6 – нижний нагреватель; 7 – решётка эллиптического днища;
8 – каналы печи; 9 – уровень расплава.

Расчетная схема (справа): $H_{\text{ж}}$ – уровень магния, R – внутренний радиус реторты.

Уравнение переноса энергии в безразмерном виде с использованием в качестве масштабов температуры T_0 , линейного размера R , времени R^2/ν и скорости ν/R в подобласти, заполненной расплавом имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\text{Pr}} \nabla^2 T, \quad (1)$$

где T, τ, u, v, r, z – безразмерные температура, время, радиальная и вертикальная компоненты скорости и координаты соответственно, $\text{Pr} = \nu/\chi$ – число Прандтля, куда входят турбулентные коэффициенты, $\text{м}^2/\text{с}$: $\nu_{\text{T}} = \nu(1 + 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Re})$ – вязкости и $\chi_{\text{T}} = \nu_{\text{T}} \cdot \text{Pr}^{-1/3}$ – температуропроводности, ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$, $\text{Re} = \nu_0 R/\nu_{\text{T}}$ – число Рейнольдса.

Определено, что характер течения магния в аппарате восстановления турбулентный, это учитывалось вводом турбулентных вязкости и температуропроводности в уравнение для определения числа Прандтля.

Безразмерные уравнения переноса завихренности ω , уравнения для определения компонент скоростей и уравнение Пуассона для функции тока ψ

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \frac{u}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\omega r) + v \frac{\partial \omega}{\partial z} = \nabla^2 \omega - \frac{\omega}{r^2} + \text{Gr} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (2)$$

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \nabla^2 \psi - 2 \frac{\partial \psi}{\partial r} = -\omega r, \quad (3)$$

где $Gr = \beta g R^3 T_0 / \nu^2$ – число Грасгофа, β – коэффициент объёмного расширения, K^{-1} , $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Оператор Лапласа в цилиндрических координатах

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (4)$$

Система уравнений (1)–(3) замыкается краевыми условиями, характеризующими технологический процесс. В начальный момент времени в расчетной области задаются параметры изотермического равновесного расплава магния

$$T(r, z, \tau = 0) = T_0, \quad \omega(r, z, \tau = 0) = \psi(r, z, \tau = 0) = 0, \quad (5)$$

где $T_0 = 780^\circ\text{C}$ – начальная температура расплава магния и губчатого титана.

Граничное условие теплообмена на верхней границе:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} (z = H_{\text{ж}}) = Nu(T - T_c), \quad (6)$$

на правой границе в зоне нагревателя

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} (0 \leq z \leq H_{\text{ж}}) = R_{\text{БН}}, \quad R_{\text{БН}} = N_{\text{БН}} / (2\pi R H_{\text{ж}}), \quad (7)$$

на нижней границе

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} (0 \leq r \leq R) = R_{\text{НГ}}, \quad R_{\text{НГ}} = N_{\text{НГ}} / (\pi R^2), \quad (8)$$

на оси симметрии

$$\frac{\partial T}{\partial r} (0 \leq z \leq H_{\text{ж}}) = 0, \quad (9)$$

где $R_{\text{БН}}$, $R_{\text{НГ}}$ – плотности тепловых потоков соответственно в зоне бокового и нижнего нагревателей; $N_{\text{БН}}$, $N_{\text{НГ}}$ – мощности бокового и нижнего нагревателей; T_c – температура окружающей среды; Nu – безразмерный коэффициент теплопередачи от крышки аппарата в окружающую среду.

Граничные условия по скоростям и функции тока включают прилипание на твердых границах, недеформируемую верхнюю поверхность расплава и нулевые радиальные скорости на оси симметрии.

Система уравнений (1)–(3) с начальными и краевыми условиями (5)–(9) описывает тепломассоперенос в реакторе получения губчатого титана и решается численным методом в соответствии с методикой, описанной в работе [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для промышленных аппаратов с цикловым съёмом по губчатому титану 4,8 и 7,0 т выполнено компьютерное моделирование тепломассобменных процессов, протекающих в расплаве магния в ходе разогрева. Заданные размеры расчётных областей соответствуют реальным размерам реторт и начальному уровню расплава в аппаратах 4,8 т – $R = 0,775 \text{ м}$; $H_{\text{ж}} = 2,560 \text{ м}$; для аппарата 7,0 т – $R = 0,850 \text{ м}$; $H_{\text{ж}} = 3,190 \text{ м}$. Мощности нагревателей: $N_{\text{БН}} = 282 \text{ кВт}$, $N_{\text{НГ}} = 94 \text{ кВт}$. Применяемое на практике двухпозиционное регулирование работой нагревателей учтено в математической модели вводом понижающих коэффициентов для мощностей бокового и нижнего нагревателей 0,35 и 0,15 соответственно.

Счёт выполнялся на регулярной сетке с числом разбиений 40×100 соответственно в направлении координат r , z . Теплофизические свойства магния, при задании которых получены результаты вычислительных экспериментов [9; 10], представлены в таблице 1.

Таблица 1

Теплофизические свойства магния при 700°C

№ пп	Параметр, размерность	Численное значение
1	Температура плавления T , °C	650
2	Плотность ρ , кг/м ³	1576
3	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	97,7
4	Теплоемкость c , кДж/(кг·К)	1,344
5	Вязкость динамическая μ , Па·с	$1,1 \cdot 10^{-3}$
6	Вязкость кинематическая ν , м ² /с	$0,7 \cdot 10^{-6}$
7	Коэффициент объемного расширения β , К ⁻¹	$0,38 \cdot 10^{-3}$

В таблице 2 приведены характерные для 2-х типов аппаратов безразмерные числа, участвующие математической формулировке.

Таблица 2

Безразмерные числа

Параметр	Цикловая производительность аппарата, т/цикл	
	4,8	7,0
Pr	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Gr	$1,8 \cdot 10^{11}$	$2,3 \cdot 10^{11}$
Nu	0,8	0,9

На рисунках 2 и 3 для аппаратов с различным цикловым съёмом представлены расчётные линии тока и изотермы в расчётной области, заполненной магнием после выхода процесса съёма на установление.

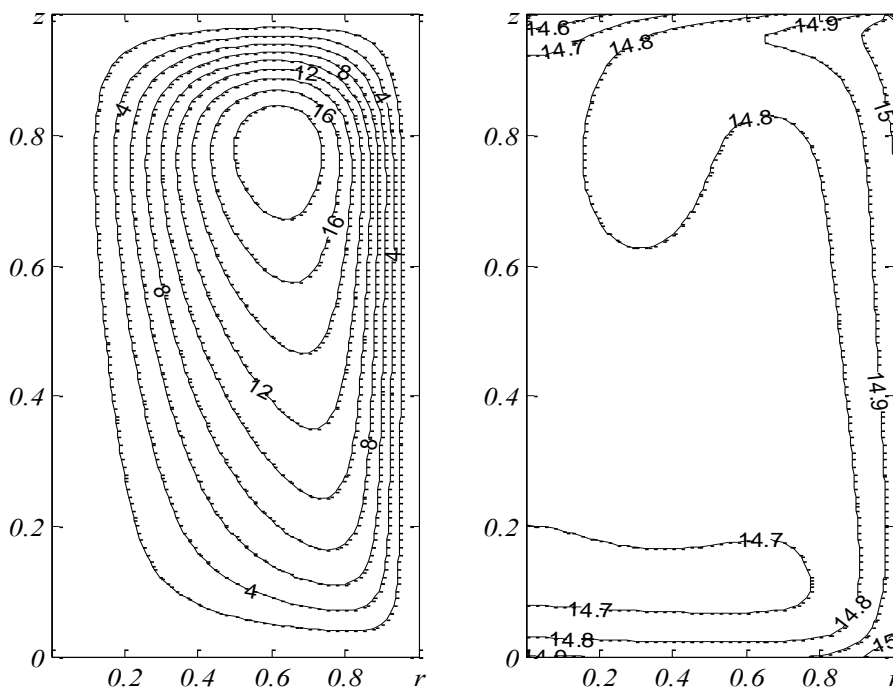


Рис. 2. Линии тока ($\psi \cdot 10^{-3}$) и температурное поле для аппарата 4,8 т/цикл в условиях разогрева, масштабы: $R = 0,775$ м; $H_{\text{ж}} = 2,560$ м; $\psi = 0,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $T = 50^\circ\text{C}$.

Полученные результаты вычислительных экспериментов для аппаратов с различным цикловым съёмом аналогичны. При подогреве снизу и сбоку в расчётной области формируется замкнутый вихрь течения расплава направленный от правой границы расчётной области

к оси симметрии. Точка с максимальным значением функции тока ($\psi_{\max} = 19,740$) расположена на рисунке 2 в координатах $r = 0,65$ и $z = 0,79$; для аппарата 7 т/цикл она смещена ближе к поверхности и имеет координаты $r = 0,65$ и $z = 0,83$. Для аппарата с большим свободным объёмом характерно более интенсивное течение расплава $\psi_{\max} = 24,701$. В нижней части расчётной области аппарата 7 т/цикл наблюдается вихрь с обратным течением расплава, образование которого вероятно обусловлено большим радиальным размером реторты.

Поля температур характеризуется концентрацией температурных градиентов у нижней, верхней и правой границ расчётной области.

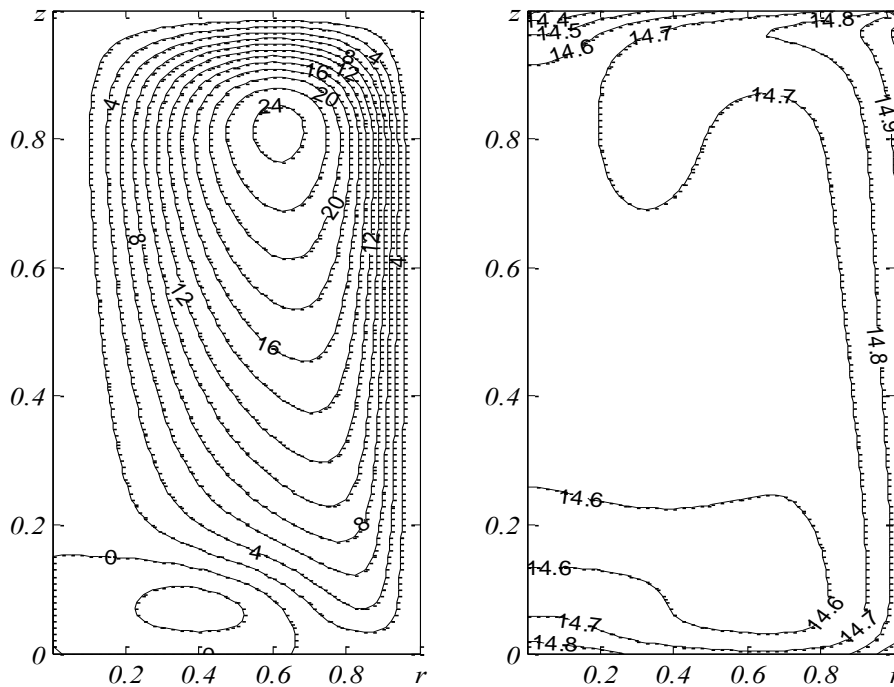


Рис. 3. Линии тока ($\psi \cdot 10^{-3}$) и температурное поле для аппарата 7 т/цикл в условиях разогрева, масштабы: $R = 0,850$ м; $H_{\text{ж}} = 3,190$ м; $\psi = 0,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $T = 50^\circ\text{C}$.

На рисунке 4 приведены эпюры вертикальных расчётных скоростей.

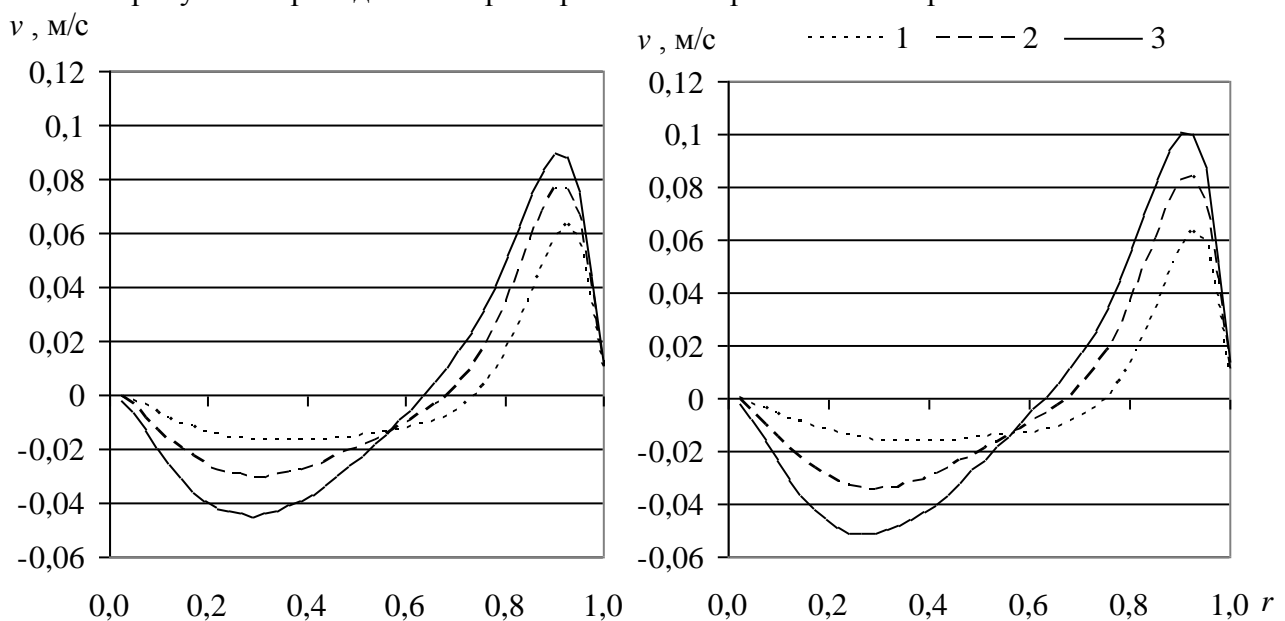


Рис. 4. Эпюры расчётных скоростей для аппаратов 4,8 (слева) и 7,0 т в сечениях, расположенных по высоте расчётной области, z : 1 – 0,25; 2 – 0,5; 3 – 0,75

Максимальные значения скоростей, полученные вблизи правой границы расчётной области ($r = 0,9$) составляют для аппаратов с цикловым съёмом 4,8 т – 0,090 м/с и 7 т – 0,101 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи разработанной математической модели выполнены параметрические расчёты по оценке тепловой и гидродинамической обстановки в период разогрева для аппаратов восстановления с цикловой производительностью 4,8 и 7 т губчатого титана. В 7-митонном аппарате наблюдается некоторая интенсификация течения расплава, обусловленная увеличением радиального вертикального размеров реторты аппарата. Разработанная математическая модель может быть использована для описания неравновесного тепломассопереноса в аппарате 7 т/цикл в ходе основной стадии процесса.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания. Проект № 1599 «Математическое моделирование тепломассопереноса в расплаве и пористой среде при электромагнитных воздействиях».

Список использованных источников

1. Гармата В.А., Петрунько А.Н., Галицкий Н.В. и др. / Титан. – М.: Металлургия. – 1983. – 559 с.
2. Парфенов О.Г., Пашков Г.Л. Проблемы современной металлургии титана – Новосибирск: СО РАН, 2008. – 279 с.
3. Танкеев А.Б., Рымкевич Д.А., Путина О.А., Путин А.А., Нечаев В.Н. Интенсификация технологического режима процесса восстановления в аппарате производительностью 4,8 – 5 т губчатого титана за цикл // Титан. – 2007. – №1(20). – С. 3–8.
4. Листопад Д.А. Усовершенствование магнитотермического процесса получения титана губчатого с целью снижения поступления примесей // Технологический аудит и резервы производства. – Харьков. – 2012. – № 3/1(5). – С. 13–14.
5. Нечаев В.Н., Цаплин А.И. Обзор способов получения губчатого титана // Титан. – 2015. – №3(49) – С. 4-13.
6. Цаплин А.И., Нечаев В.Н. Численное моделирование неравновесных процессов тепломассопереноса в реакторе для получения пористого титана // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 4. – С. 483–490.
7. Цаплин А.И., Нечаев В.Н. Математическое моделирование тепломассообменных процессов в реакторе для получения губчатого титана при порционной подаче исходного сырья // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: Сб. докл. международной науч.-практ. конф. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 397–403.
8. Цаплин А.И. Теплофизика внешних воздействий при кристаллизации стальных слитков на машинах непрерывного литья. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН. – 1995. – 238 с.
9. Эйдензон М.А. Магний / М.: Металлургия. – 1969. – 352 с.
10. Физические величины: Справочник / Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат. 1991. – 1232 с.